第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

内蒙古地表冻融指数动态变化与驱动因素分析

张昊琛[1,2]， 萨楚拉[1,2]， 孟凡浩[1,2]， 罗 敏[1,2]， 王牧兰[1,2]，
高红豆[1,2]， ADIYA Saruulzaya[3]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；3. 蒙古科学院地理与地球生态研究所，蒙古 乌兰巴托 15170）

摘 要：基于内蒙古45个气象站点1980—2019年日均地表温度数据、结合中国第一代全球陆面再分析产品（CRA）数据以及NDVI数据，利用趋势分析法、相关性分析法和灰色关联度，对内蒙古近40 a地表冻融指数时空变化特征及驱动因素进行分析。研究表明：(1) SFI（地表冻结指数）年均值的空间分布特征表现出自西南向东北递增的规律，STI（地表融化指数）则反之，纬度是影响地表冻融指数空间分布的关键因子。研究期间SFI和STI分别呈现出显著下降和上升趋势，多年变化范围分别为956.1~1848.3 ℃·d和3717.6~4442.3 ℃·d，变化率分别为−156.4 ℃·d·(10a)$^{-1}$和152.4 ℃·d·(10a)$^{-1}$；与季节冻土区相比，多年冻土区的冻融指数对气候变暖的响应更加敏感。(2) 研究区近40 a土壤表层含水量、降水量、NDVI呈增加趋势，雪深呈减少趋势，但年际变化表现出不同的空间差异性，多年冻土区呈暖干化发展趋势，季节冻土区呈暖湿化发展趋势。(3) 地表冻融指数与影响因素以负相关关系为主，SFI与影响因素在多年冻土区大部呈正相关关系，在季节冻土区大部呈负相关关系，STI则反之。内蒙古地表冻融指数变化受影响因素共同驱动，0.4 m土壤含水量是影响SFI变化的主导因素，NDVI是影响STI变化的主导因素。研究结果可为内蒙古冻土退化、农牧业生产等提供科学的参考。

关键词：内蒙古；地表冻融指数；气候变化；时空特征；驱动因素

冻土一般是指温度在0 ℃或0 ℃以下，并含有冰的各种岩土和土壤，包括永久冻土(PF)和季节性冻土(SFG)。我国是世界冻土大区，多年冻土和季节冻土分别占国土面积的22%和53.5%[1]。IPCC第5次评估显示，全球地表温度在1880—2012年期间升高了0.85 ℃[2]。全球变暖在高纬度和高海拔区域加剧，对冻土的形成有较大的影响，尤其是在我国北方高纬度，温度升高幅度大于全国平均升温水平[3-5]。随着气候变化，我国冻土大致体现在：最大冻土深度下降、冻结日期推迟、消融日期提前、冻土下限上升[6-7]。20世纪70年代至21世纪初，我国冻土面积减少约18.6%，面积由2.15×10^6 km^{2}减少到1.75×10^6 km^2[8]。按照对未来的天气情况预报，未来冰冻圈各组成部分面积将持续减少，而多年冻土的活动层厚度将会进一步增加，季节冻土的冻结深度也将进一步下降[9-10]。

冻融指数是研究冻土特性的重要参数，也是判定其存在和长期变化的一个重要指标[11]。冻土研究中冻融指数有助于绘制和预测永久冻土分布，估算土壤冻结深度，并计算活跃层厚度，冻结指数的下降和融化指数的上升在一定程度上说明冻土环境的退化[12]。利用季节冻土区的冻结指数，可以预测季节冻融深度[13]；利用多年冻土区的冻融指数，不仅能够绘制出冻土的分布图，还能对多年冻土的活动层厚度进行预测[14-15]；Peng等[12]的研究结果显示，北半球高纬度和高海拔地区的冻结指数下降幅度最大，冻结指数的下降速率要比融化指数的上升速率快得多；Shi等[16]研究表明，从1901—2015年，

收稿日期：2022-04-19； **修订日期：**2022-07-03
基金项目：国家自然科学基金项目(41861014)；内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS03042，2020BS04009)；内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0061)
作者简介：张昊琛(1996-)，男，硕士研究生，主要从事冰冻圈遥感研究. E-mail: 18748311787@163.com
通讯作者：萨楚拉. E-mail: sachulan@126.com

环北极地区的冻结和融化指数分别呈现降低、上升趋势，在1988年之后，其变化趋势更为明显；Liu等[17]基于地面温度观测资料和再分析产品计算了雅鲁藏布江上游冻融指数，并基于冻融指数模拟了冻土面积的变化，效果良好；Wu等[18]对青藏高原冻融指数的变化规律进行了分析，发现多年冻土区的冻结指数比季节冻土区的冻结指数降低速度要快，而融化指数上升速率更慢；Wang等[19]研究认为，黄河源区海拔高度对冻融指数的空间分布有一定的影响，地表冻融指数的变化比空气冻融指数的变化要大。

内蒙古地区的气象观测站数量较少，有些站点建设时间较晚，总体分布稀疏，个别站点存在数据缺失问题，气候变化条件下的冻融指数变化研究较为欠缺。仅有的研究主要聚焦在典型草原或多年冻土区，且研究对象为空气冻融指数[20-21]，不能完全代表内蒙古全区的地表冻融特征，并且研究区地表冻融指数变化的驱动因素有待探究。鉴于此，本文基于内蒙古气象站1980—2019年日均地表温度数据、结合中国第一代全球陆面再分析产品（CRA）数据以及NDVI数据，对内蒙古近40 a地表冻融指数时空变化特征及驱动因素进行分析，该研究能够为下一步估算内蒙古季节冻土冻结深度、多年冻土活动层厚度、模拟冻土面积变化等提供重要参数数据，以及为内蒙古农牧业生产布局、草场生态评价及冻害防治等方面提供一定的科学依据。

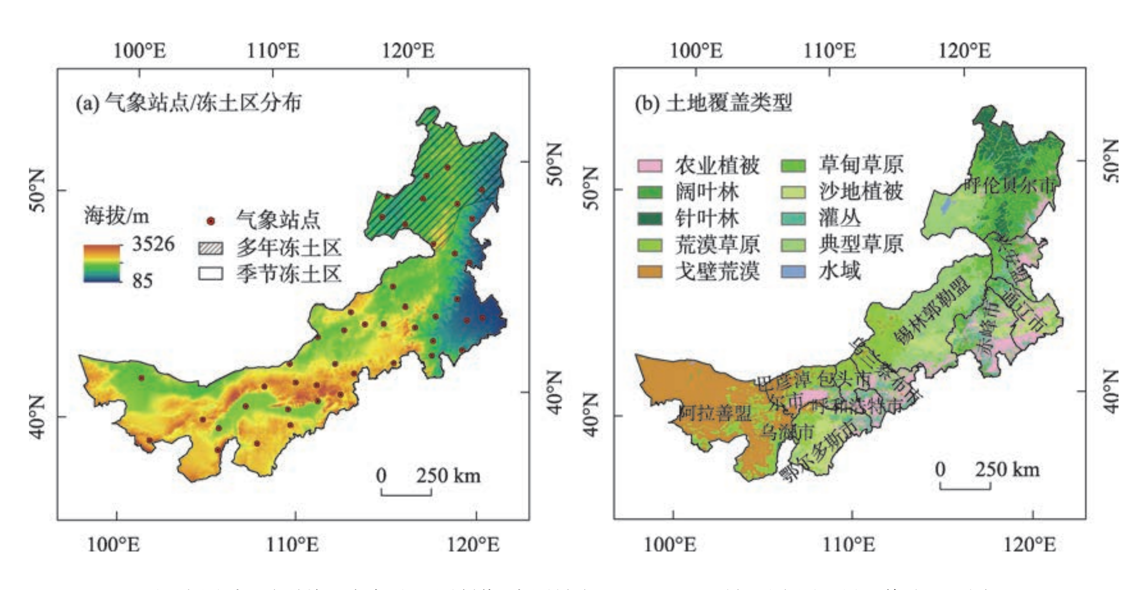
1　数据与方法

1.1　研究区概况

内蒙古位于126°04′～97°12′E，37°24′～53°23′N之间（图1），地处北部边疆，总面积118.3×10⁴ km²，占全国总面积的12.3%。地貌以高原为主，兼有平原、沙地、丘陵与山地，大部分地区海拔在1000 m以上[22]。气候属温带大陆性季风气候，处于干旱与半干旱气候带，年平均气温0~8 ℃，且由东北向西南递增；全区降水量少且分布不均，年总降水量50~450 mm，由东北向西南递减[23]。气候分异明显使得研究区域从东北向西南呈现出寒温带针叶林、落叶阔叶林、草甸草原、典型草原、荒漠草原等植被分布[22]。研究区位于环北极地区多年冻土区欧亚大陆多年冻土南界。冬季严寒，夏季高温，且局地日夜温差大，春冬季土壤冻融现象突出，夏秋季土壤干湿交替明显[24]。多年冻土主要分布于呼伦贝尔地区，其余地区广泛分布季节冻土，浅层表层土壤冬季结冰，夏季完全解冻。

1.2　数据来源与处理

使用的45个气象台站1980—2019年日平均0 cm地表温度观测数据来自于国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集（http://data.cma.cn/）。为更好地体现研究区的冻融特征，尽量采用过去40 a来不同观测站的共同时间数据来求取地表



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)1822号，对底图边界无修改。下同。

图1　内蒙古气象站点/冻土区分布及土地覆盖类型

Fig. 1　Distribution of meteorological stations/permafrost regions and land cover types in Inner Mongolia

冻融指数。对缺测数据采用如下方式内插[25]：缺测1 d，对其前后各1 d数据的平均值内插；缺测2 d，在缺测当天选择该日前2 d的数值取平均，缺测第2 d选取该日后2 d的数值取平均；如果有连续2 d以上的缺测，可以利用对相邻站同一月份的温度平均值做线性相关性检查，再选取温度相关性最佳的站点用线性回归的温度估计值内插。采用反距离插值法(inverse distance weighted)对内蒙古45个气象站点的地表冻融指数进行空间插值，插值分辨率为34 km。

冻土类型分区依据青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)提供的1:1000冻土分区和类型地图资料进行划分，通过对冻土类型整合，整体划分为多年冻土区和季节冻土区，用来对地表冻融指数和影响因素分区讨论。0.1 m和0.4 m表层土壤含水量、降水量、雪深数据均源自我国国家气象信息中心的中国第一代全球大气和陆面再分析产品CRA/Land-逐月陆面产品（http://data.cma.cn/），空间分辨率为34 km，用来分析内蒙古地表冻融指数影响因素时空变化。

GIMMS NDVI3g数据由美国马里兰大学GLCF(Global Land Cover Facility)研究组生产的15 d合成产品数据(https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/)，MODIS NDVI数据为美国国家航天航空局(NASA)提供的MODIS 16 d合成产品数据(https://modis.gsfc.nasa.gov/data/)。在GIMMS NDVI和MODIS NDVI的基础上，采用线性回归分析，对2种数据进行时间序列的重建，从而使数据重采样到同一个时空尺度上。使用重合时间的GIMMS NDVI和MODIS NDVI进行建模，根据建模结果对GIMMS数据作延长，获取1982—2019年NDVI数据。对于NDVI数据的预处理，主要分为坐标变换、数值裁剪、数据转换、异常值删除、月最大值获取等过程，使参与计算的所有NDVI值在0~1范围内，根据研究区土地覆盖分类图（图1），结合研究区实际情况，认为NDVI<0.15的地区无植被覆盖。考虑到数据空间分辨率的一致性，对NDVI数据重采样为34 km。

1.3 研究方法

（1）地表冻融指数计算。基于Klene等[26]和Frauenfeld等[15]对冻结期和融化期的限制，界定冻结期介于每年7月1日至次年6月30日，融化期介于每年1月1日至12月31日，以最大可能统计一年中寒冷期（温度<0 ℃）和温暖期（温度>0 ℃）的温度累加值，并确保负温和正温计算分别在整个寒冷期和温暖期内。年冻结指数计算如下：

$$\mathrm{FI}=\sum_{i=1}^{N_f}\left|T_i\right|,\quad T_i<0\ ^{\circ}\mathrm{C} \tag{1}$$

$$\mathrm{TI}=\sum_{j=1}^{N_T}T_j,\quad T_j>0^{\circ}\ \mathrm{C} \tag{2}$$

式中：FI和TI分别为冻结指数和融化指数(℃·d)；T_i和T_j分别为负值逐日地表温度和正值逐日地表温度，单位为℃；N_f和N_T为年内地表温度小于和大于0 ℃的天数，单位为d。

（2）趋势分析。利用一元线性回归方法计算冻融指数和影响因素的年际变化趋势，并通过最小二乘法拟合的斜率反映，当斜率大于0时，说明有增大的倾向，当斜率小于0时，说明有下降的倾向。其变化趋势的计算公式为：

$$Slope=\frac{n\sum_{i=1}^{n}i\times\overline{X}_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\overline{X}_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{3}$$

式中：$Slope$表示地表冻融指数或影响因素的变化趋势；n为时间序列长度；$\overline{X}_i$为研究对象X第i年的平均值。

（3）相关分析法。通过计算地表冻融指数与对应的影响因素相关系数，表示其与地表冻融指数的相关性。计算公式如下：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{4}$$

式中：n表示研究时间段的累计年数；r_{xy}表示x和y的相关系数；x_i和y_i分别表示第i年x和y的值；$\bar{x}$和$\bar{y}$表示2个要素样本值的平均值；r_{xy}在-1~1之间，随着绝对值的增大，地表冻融指数与影响因素的变化关系也相应较好；反之越差，当$r_{xy}>0$表示相关性为正，$r_{xy}<0$，表示相关性为负[27]。最后采用T检验法进行显著性检验，将地表冻融指数与影响因素的相关程度划分为显著相关（$0.01\leq P<0.05$）和不显著相关（$P\geq 0.05$）。

（4）灰色关联分析。采用灰色关联分析法，研究影响地表冻融指数的主要因子及重要性。灰色关联度可以测量2个系统之间的关系，并确定相关

因子中的主控因子[28]。地表冻融指数的时间序列作为目标变量，将0.1 m土壤含水量、0.4 m土壤含水量、降水量等影响因素作为影响变量。灰色关联系数表达为：

$$\xi_i(k)=\frac{\min_i \min_k\left|y(k)-x_i(k)\right|+\rho \max_i \max_k\left|y(k)-x_i(k)\right|}{\left|y(k)-x_i(k)\right|+\rho \max_i \max_k\left|y(k)-x_i(k)\right|} \tag{5}$$

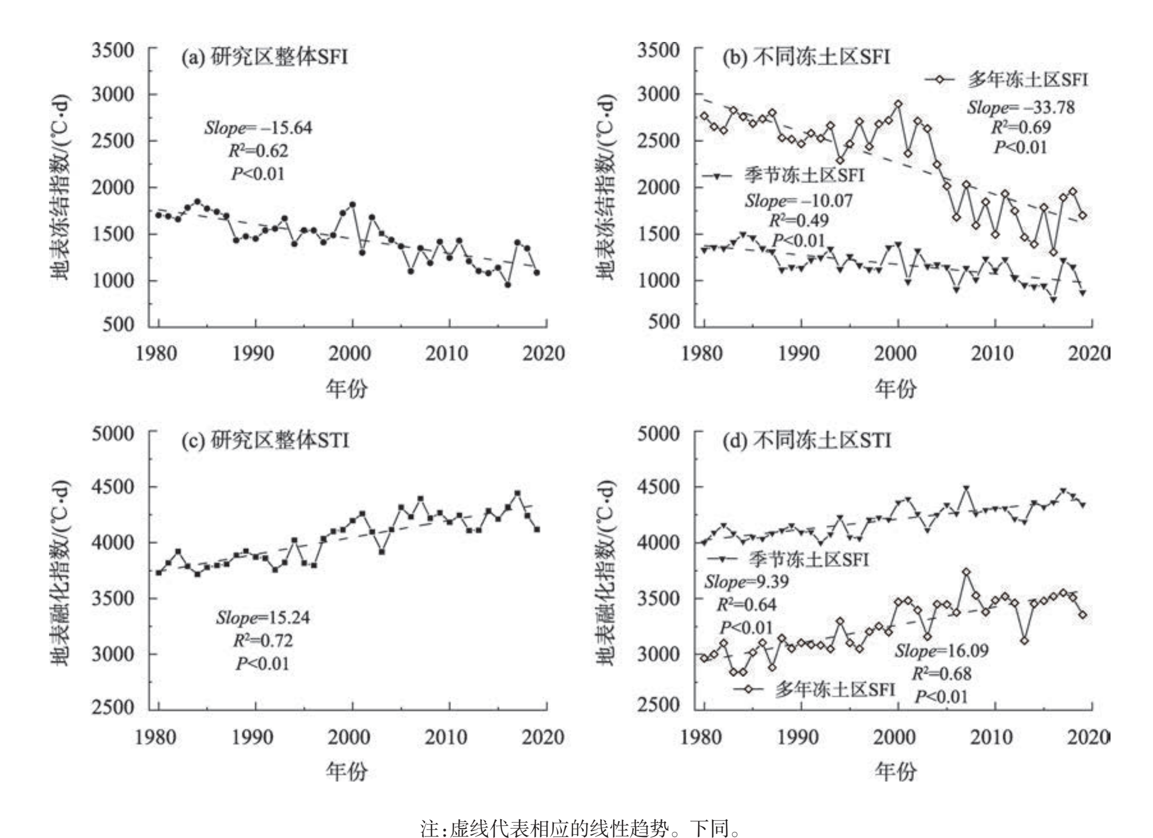
$$G_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\xi_i(k) \tag{6}$$

式中：$\xi_i(k)$为影响变量与目标变量的灰色关联系数；ρ为分辨系数，参考以往研究，在本文中ρ取0.5[29]；$\min_i \min_k\left|y(k)-x_i(k)\right|$为二级最小差；$\rho \max_i \max_k\left|y(k)-x_i(k)\right|$为二级最大差；$\left|y(k)-x_i(k)\right|$为各比较数列$x_i$曲线上的每个点与参考数列$x_0$曲线上每个点差的绝对值。$G_i$为比较数列$x_i$对参考数列$x_0$的灰色关联度，用以表达二者之间的联系紧密程度，该值越接近1，说明相关性越好。灰色关联度最大的影响变量为目标变量的主导影响因素，即主控要素。

2 结果与分析

2.1 内蒙古地表冻融指数时空变化

2.1.1 地表冻融指数的时间变化特征　通过对内蒙古地区1980—2019年的45个观测站SFI（地表冻结指数）和STI（地表融化指数）进行分析，得到研究区40 a整体和不同冻土区SFI与STI的时间变化特征。如图2a和图2b所示，整体上SFI近40 a呈现显著下降趋势，多年冻土区SFI下降速率高于季节冻土区，内蒙古SFI多年变化范围介于956.1~1848.3 ℃·d，最低值和最高值分别发生于2016年和1984年，年均值为1457.0 ℃·d，变化率为−156.4 ℃·d·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)，表明土壤的季节冻结潜力有连续降低的趋势[30]。进一步分析各站点SFI变化特征，近40 a所有站点的SFI均呈下降趋势，但各站SFI变化特征差异也较大，变化最小值和最大值分别出现于阿拉善盟阿拉善右旗站点[−20.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$]和兴安盟阿尔山站点[−711.1 ℃·d·(10a)$^{-1}$]。如图2c和图2d所示，整体上STI近40 a呈现显著上升趋



注：虚线代表相应的线性趋势。下同。

图2　1980—2019年内蒙古整体和不同冻土区地表冻融指数年际变化趋势

Fig. 2　Interannual variation trend of surface freezing-thawing indices in Inner Mongolia and different permafrost regions from 1980 to 2019

势，多年冻土区STI上升速率高于季节冻土区，内蒙古STI多年变化范围介于3717.6~4442.3 ℃·d，最低值和最高值分别发生于1984年和2007年，年均值为4040.9 ℃·d，上升速率为152.4 ℃·d·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)，说明土壤融化期间最大融化深度增加[30]。1980—2019年间，所有站点的STI均呈上升趋势，各站STI变化特征存在差异，变化特征最小值和最大值分别出现于赤峰市赤峰站点[43.1 ℃·d·(10a)$^{-1}$]和赤峰市巴林左旗站点[221.1 ℃·d·(10a)$^{-1}$]。

2.1.2 *地表冻融指数空间分布与变化* 内蒙古SFI多年平均值的空间分布特征如图3a所示，受经度、纬度和海拔的综合影响，SFI均值总体呈现西低东高、由西南向东北逐渐增加的特征，其中SFI受纬度的影响最大(表1)，相关系数达到0.92($P<0.01$)，每上升1°，SFI增加165.2 ℃·d，该分布特征同环北极冻融指数分布变化特征一致[12,16]。SFI高值区位于呼伦贝尔北部地区，SFI低值区位于阿拉善西部地区，与冻土区分布状况类似，多年冻土区SFI普遍大于季节冻土区。内蒙古SFI年际变化率空间分布特征见图3b，SFI年际变化率的变化范围介于−10.3~−710.6 ℃·d·(10a)$^{-1}$，SFI变化率在空间上自西南向东北呈增加趋势，表明内蒙古东北地区SFI下降速率较西南地区更快。

内蒙古STI多年平均值的空间分布特征见图3c，STI均值的空间分布特征呈现西部高，东部低，由西南向东北逐渐减小的趋势，多年冻土区的STI普遍小于季节冻土区，在呼和浩特、赤峰等地出现了点状高值区，这与近几年农业开发、城市扩张、工业发展等社会经济活动密切相关。同时，上述地区处于生态环境较为脆弱，人为活动对环境的影响更加敏感。STI同纬度的相关系数最高(表1)，为−0.73($P<0.01$)，每上升1°STI减少141.1 ℃·d，STI高值区位于阿拉善西北部地区，STI低值区位于呼伦贝尔中部地区。内蒙古STI年际变化率空间分布特征见图3d，STI上升速率较高的地区(*Slope*>150 ℃·d·(10a)$^{-1}$)主要分布在研究区中部、中东部和东北部分地区，可能是因为STI上升速率较高的地区受人类活动等因素的影响，其次，呼伦贝尔高原大部分地区的冻融指数变化率最大，这也证实了该区域(原岛状冻土区)目前处于季节性冻土的状态[31]。

2.2 内蒙古地表冻融指数影响因素时空变化

2.2.1 *内蒙古地表冻融指数影响因素时间变化* 如图4所示，近40 a研究区0.1 m和0.4 m土壤含水量年均值分别介于0.1401~0.1673 m^3·m^{-3}和0.1388~0.1779 m^3·m^{-3}之间，0.4 m土壤含水量略大于0.1 m土壤含水量，不同深度土壤含水量的总体变化趋势均显示出向上态势，平均年际变化率为0.001 m^3·m^{-3}·(10a)$^{-1}$，而0.1 m和0.4 m土壤含水量并不是呈现一致性的向上态势，而是随气候波动经历了“上升−下降−上升”3个波动性变化阶段，且0.1 m和0.4 m深度的土壤含水量年际变化趋势大体相同：1980—1998年为波动上升阶段，1998—2007年呈波动下降趋势，2007—2019年又呈波动上升趋势；降水量以10.0 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈不显著增加趋势($P>0.05$)，年均值介于240.1~415.9 mm之间，降水量与0.1 m和0.4 m土壤含水量的年际波动变化趋势极为相似，同样经历了“上升−下降−上升”3个波动变化阶段，1980—1998年、2007—2019年属于降水偏丰的年代；1998—2007年属于降水偏枯的年代；研究区雪深以11.4~32.8 mm的起伏趋势为主，多年积雪厚度为22.1 mm，年平均雪深以−0.82 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈微弱减少趋势($P>0.05$)；基于1982—2019年内蒙古NDVI数据，发现内蒙古NDVI总体以0.007·(10a)$^{-1}$的速率呈显著增加趋势($P<0.05$)，年均值介

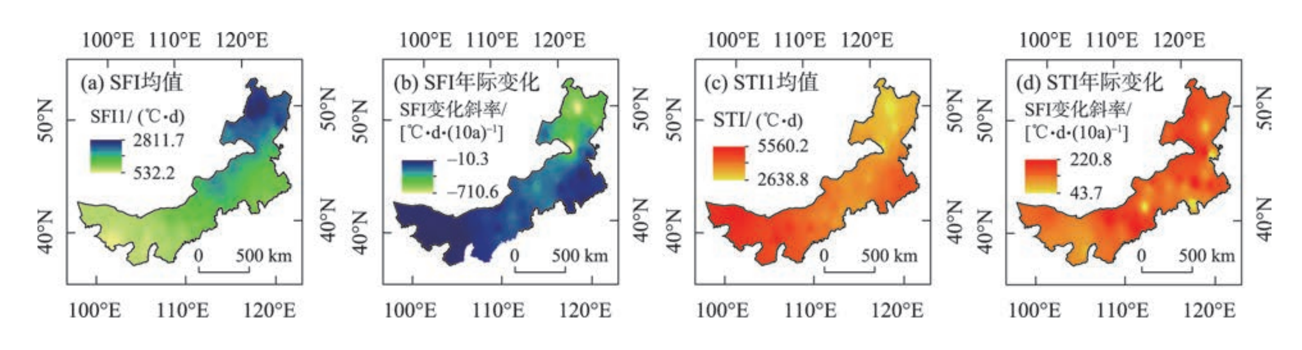


图3 1980—2019年内蒙古地表冻融指数均值和变化趋势

Fig. 3 Mean value and variation trend of surface freezing-thawing index in Inner Mongolia from 1980 to 2019

表1　地表冻融指数与地理因子的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between surface freezing-thawing index and geographical factors

因子	年均SFI	年均STI
经度	0.63**	-0.62**
纬度	0.92**	-0.73**
观测场拔海高度/m	-0.38**	0.12

注：*表示通过 $P<0.05$ 显著水平检验；**表示通过 $P<0.01$ 显著水平检验。

于0.41~0.47之间。

2.2.2 内蒙古地表冻融指数影响因素空间分布与变化　如图5所示，研究区内各影响因素空间分布整体上存在明显的纬度地带性和区域性规律，且均呈现出由西南向东北递减的发展趋势，与SFI空间分布特征一致，与STI空间分布特征相反。但上述要素在部分地区空间分布和空间变化存在一定差异：0.1 m和0.4 m土壤含水量呈现出东北部和中西部土壤水分相对较高、西部相对较低的空间格局，可能受到不同土地覆盖类型、积雪分布及人为活动等多重因素的共同作用；由于大兴安岭、阴山、贺兰山等地势因素的阻碍，东南地区的水汽抬升，容易造成降雨，西北山区的水汽含量偏低，因此东南地区的降水量比西北地区大；雪深与降水量分布特征基本一致，但与温度相反，研究区东北部降水量较多、年均地表温度较低且森林覆盖率高，有利于积雪的形成和积累，中部和西部地区降水较少，平均地表温度较高，植被覆盖率较低，不利于积雪的形成与累积，使得雪深较浅且分布均匀；内蒙古NDVI由西南向东北呈增加趋势，部分地区NDVI存在区域性特征和空间异质性较明显，可能与灌溉和开垦农田等人类活动有关。

如图6所示，近40 a来内蒙古大部分地区0.1 m和0.4 m土壤含水量年际变化呈上升态势，0.1 m和0.4 m土壤含水量呈减少态势的区域分别仅占研究区整体的19.9%和36.1%，且大部分集中在研究区西北部和东北部的多年冻土区；内蒙古中部和西部的年降水量有所增加，特别是中偏南地区降水量增加

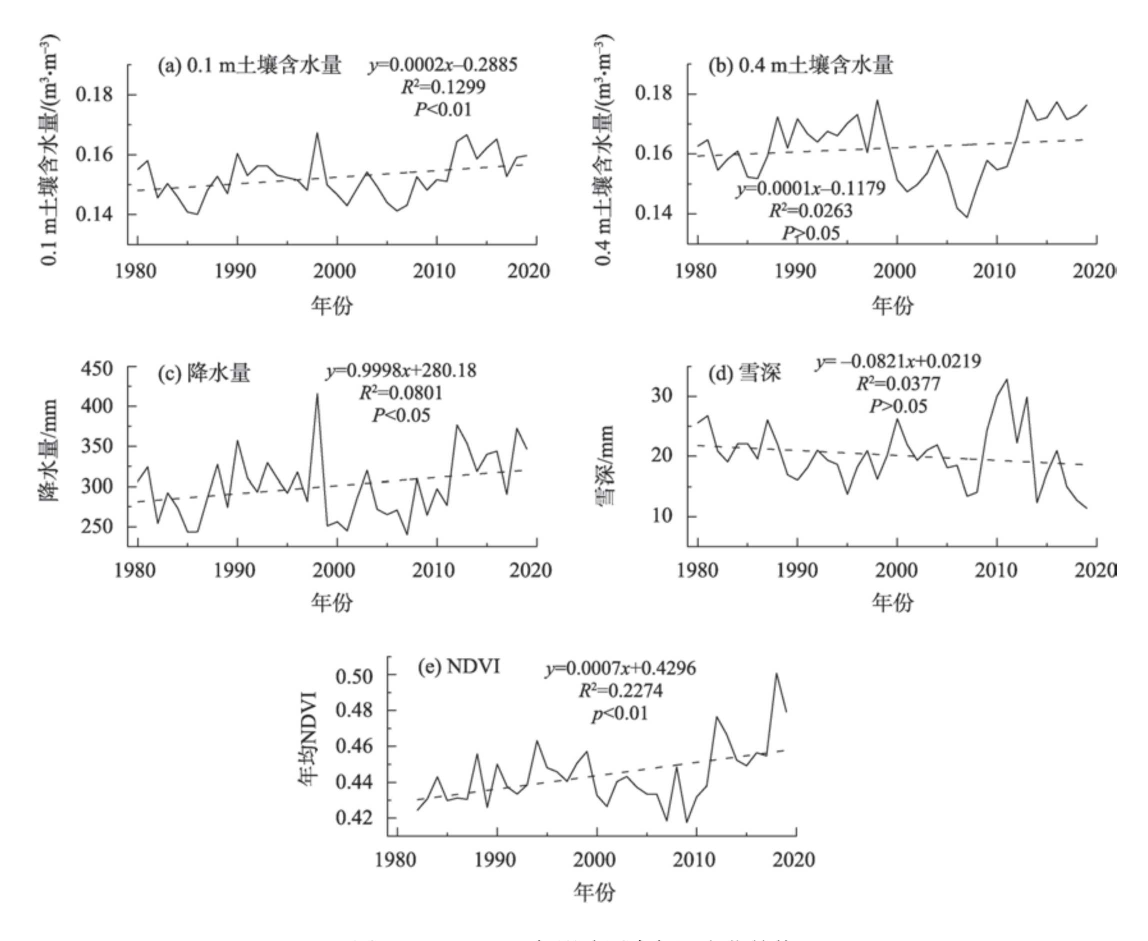


图4　1980—2019年影响因素年际变化趋势

Fig. 4 Interannual variation trend of impact factors from 1980 to 2019

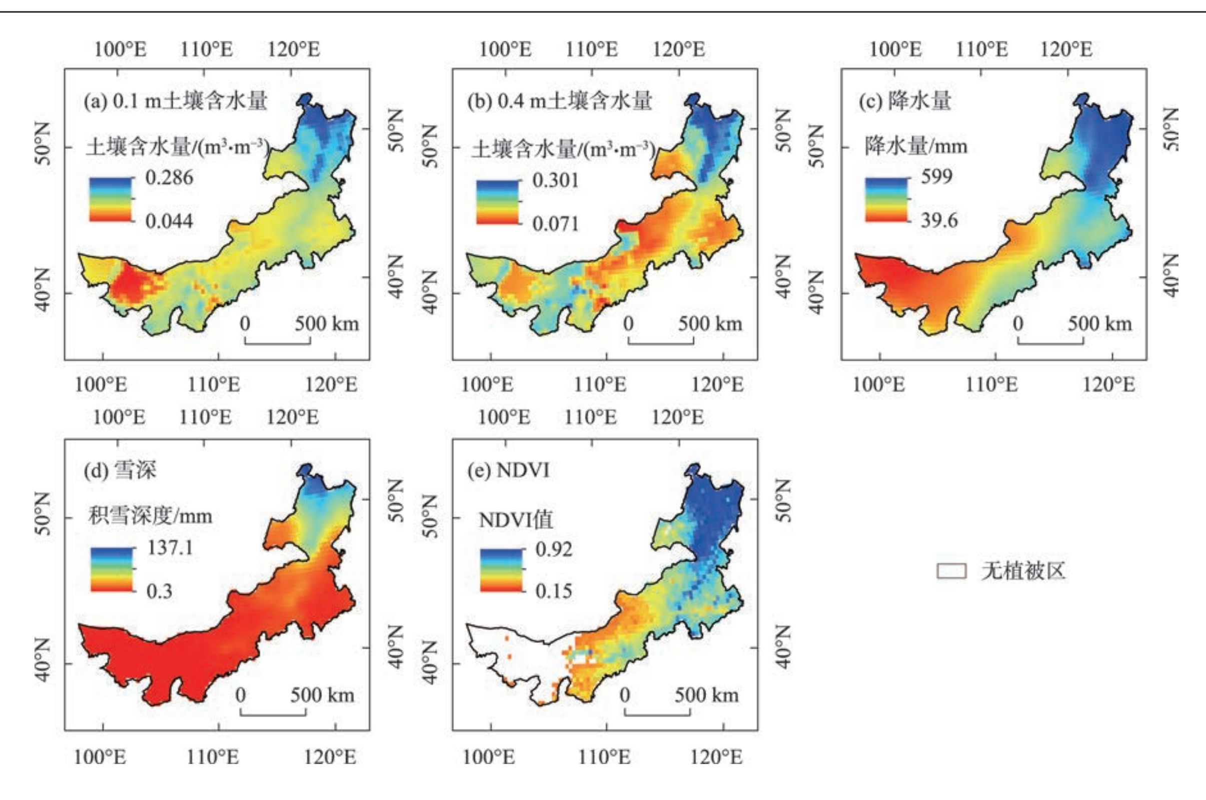


图5 1980—2019年地表冻融指数影响因素多年平均

Fig. 5 Annual average of surface freezing-thawing index influencing factors from 1980 to 2019

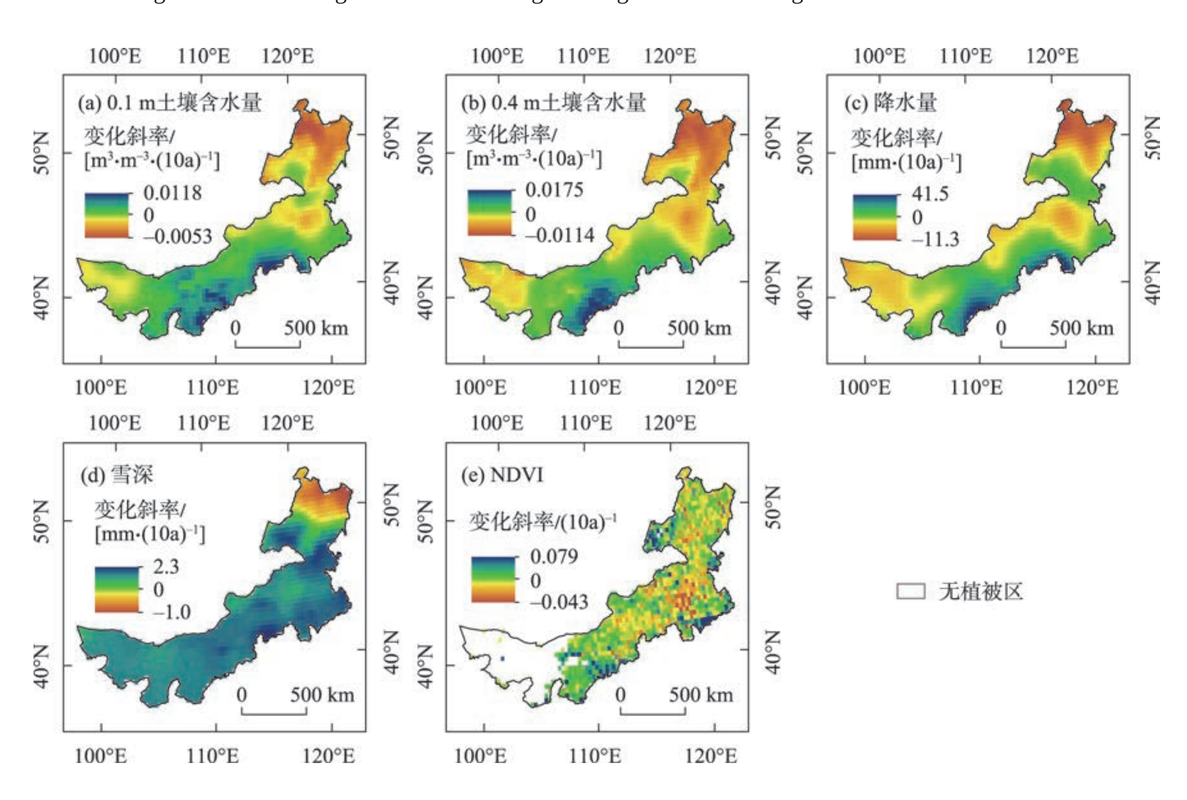


图6 1980—2019年地表冻融指数影响因素年际变化

Fig. 6 Interannual variation of surface freezing-thawing index influencing factors from 1980 to 2019

较多，东部降水量则有所减少，特别是在呼伦贝尔西北部、赤峰中部以及通辽中部地区降水量减少情况较为突出；研究区38.5%的区域雪深呈下降态势，且10.8%的区域雪深平均下降速度在0.5 mm·(10a)$^{-1}$以上，主要分布在呼伦贝尔东北部，并位于多年冻土区；61.5%的区域雪深呈现增加趋势，主要

分布于西南部的沙漠及中部和东部的部分草原,多位于季节冻土区,且以上区域的雪深平均增加速率仅为0.4 mm·(10a)$^{-1}$,这一变化特征可能与研究区近年来温度和降水变化有关;研究时段内蒙古有75.2%区域的NDVI呈现增长的趋势,仅24.8%的区域呈现下降的趋势,下降区域以锡林郭勒盟大部、赤峰市北部、通辽市北部、兴安盟南部、呼伦贝尔市林区为主,这一变化特征可能与上述地区近年来温度升高、降水减少及人类活动有关。

2.3 地表冻融指数与影响因素相关分析

地表冻融指数的变化受多种因素的影响,具有较强的随机性,适于进行灰色关联度分析。如表2所示,内蒙古地表冻融指数年均值与0.1 m土壤含水量、0.4 m土壤含水量、降水量、雪深、NDVI的灰色关联度系数皆大于0.65,说明地表冻融指数变化与各影响因素存在较大的相关性。SFI与影响因素的灰色关联序为:0.4 m土壤含水量 > 0.1 m土壤含水量 > NDVI > 降水量 > 雪深,说明了0.4 m土壤含水量对SFI变化的影响较大,是影响内蒙古整体SFI变化的主控因素,0.1 m土壤含水量、NDVI、降水量次之,最后是雪深;STI与影响因素的灰色关联序为:NDVI > 0.1 m土壤含水量 > 0.4 m土壤含水量 > 降水量 > 雪深,表明NDVI对STI变化的影响较大,是影响内蒙古整体STI变化的主控因素,0.1 m土壤含水量、0.4 m土壤含水量、降水量次之,最后是雪深。

表2 地表冻融指数与影响因素灰色关联系分析

Tab. 2 Grey correlation analysis between surface freezing-thawing index and influencing factors

影响因素	地表冻融指数关联度结果			
	SFI关联度	SFI关联序	STI关联度	STI关联序
0.1 m土壤湿度	0.76	2	0.859	2
0.4 m土壤湿度	0.761	1	0.833	3
降水量	0.685	4	0.739	4
雪深	0.681	5	0.671	5
NDVI	0.754	3	0.864	1

为探讨地表冻融指数对影响因素变化的动态响应,基于像元尺度逐像元计算了内蒙古地表冻融指数与影响因素的相关关系。SFI与各影响因素(除雪深外)相关关系有超过65%的地区呈负相关(表3),如图7所示,从空间分布来看,在多年冻土区大部分地区呈现正相关关系,但在季节冻土区大部分地区却呈现负相关关系,造成不同冻土区SFI与

表3 SFI与影响因素相关系数面积占比

Tab. 3 Area ratio of correlation coefficient between SFI and influencing factors

相关性	SFI				
	0.1 m土壤含水量	0.4 m土壤含水量	降水量	雪深	NDVI
显著正相关	1.1%	8.9%	0.0%	5.3%	3.3%
不显著正相关	16.0%	24.0%	11.4%	43.2%	20.8%
不显著负相关	35.0%	29.9%	55.9%	46.3%	48.3%
显著负相关	47.9%	37.2%	32.7%	5.2%	24.6%

影响因素相关性差异的原因可能与影响因素的时空变化差异有关。其中,0.1 m土壤含水量与SFI显著负相关(P<0.05)的区域大部分在季节冻土区的中部和东南部,显著正相关(P<0.05)区域集中分布在多年冻土区北部小部分地区,0.4 m土壤含水量与SFI显著负相关(P<0.05)的地区在季节冻土区的南部和东南部均有分布,显著正相关(P<0.05)的地区则在多年冻土区北部呈现片状分布;降水量与SFI显著负相关(P<0.05)的地区主要在鄂尔多斯市以东、呼和浩特市和锡林郭勒盟以南,呈正相关关系的区域主要在多年冻土区北部和阿拉善中西部;NDVI与SFI显著负相关(P<0.05)的区域主要在鄂尔多斯东部、呼和浩特市南部和多年冻土区部分林地,显著正相关(P<0.05)区域主要在多年冻土区部分林地和湿地地区;雪深与SFI显著负相关(P<0.05)的区域主要在阿拉善西南部和季节冻土区中部地区零星分布,显著正相关(P<0.05)区域集中在多年冻土区北部和阿拉善西北部小片地区。

STI与影响因素的相关关系以负相关为主(表4)。如图8所示,虽然STI与各影响因素在多年冻土区及大部分地区呈现负相关关系,但在季节冻土区部分地区却呈现正相关关系,造成不同冻土区STI与影响因素相关性差异的原因可能与影响因素的时空变化差异有关。其中,0.1 m土壤含水量与STI显著负相关(P<0.05)区域集中在多年冻土区东部和多年冻土区周围的盟市,显著正相关(P<0.05)的区域在黄河流域内蒙古地区有所分布;0.4 m土壤含水量与STI显著负相关(P<0.05)区域主要在多年冻土区北部和阿拉善西部零星地区,显著正相关(P<0.05)的区域主要在阿拉善东部、巴彦淖尔市大部和鄂尔多斯市周边;降水量与STI显著负相关(P<0.05)区域主要在锡林郭勒盟东部、兴安盟东部及多年冻

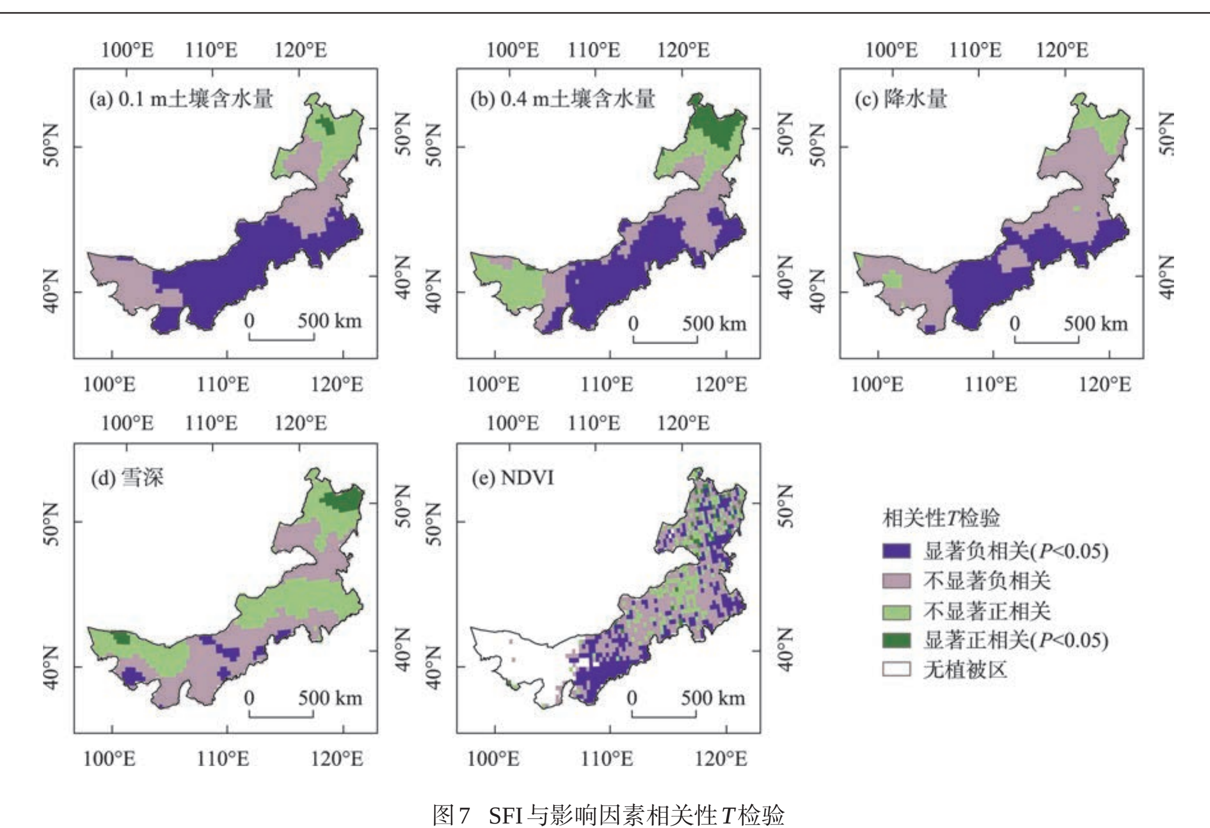


图7 SFI与影响因素相关性T检验

Fig. 7 Correlation T test between SFI and influencing factors

表4 STI与影响因素相关系数面积占比

Tab. 4 Area ratio of correlation coefficient between STI and influencing factors

相关性	STI				
	0.1 m土壤含水量	0.4 m土壤含水量	降水量	雪深	NDVI
显著正相关	8.1%	12.1%	0.0%	2.0%	18.1%
不显著正相关	36.9%	24.5%	34.1%	35.8%	33.8%
不显著负相关	31.5%	29.0%	53.8%	54.5%	32.2%
显著负相关	23.5%	34.4%	12.1%	7.7%	12.9%

土区东北部，呈正相关关系的区域主要在季节冻土区中部和西部；雪深与STI显著负相关($P<0.05$)区域主要在锡林郭勒盟西北部、赤峰市北部及多年冻土区东北部，显著正相关($P<0.05$)的区域集中在巴彦淖尔市中部。NDVI与SFI显著负相关($P<0.05$)的区域主要在赤峰市北部、兴安盟、多年冻土区部分林地和锡林郭勒盟荒漠草原地区，显著正相关($P<0.05$)的区域主要在黄河流域内蒙古地区、通辽市和多年冻土区北部。

3 讨 论

气候变暖背景下，内蒙古1980—2019年间地表冻结和融化指数分别显著上升和下降，多年冻土区地表冻融指数变化速率较季节冻土区更快。研究结果基本与Peng等[12]、Wu等[18]、李昀赟等[32]分别在北半球、青藏高原、东北地区的结论相吻合，说明在内蒙古整体冻土环境退化明显，多年冻土区冬季温度变暖趋势更为显著，其冻土退化更严重，该区地表冻融指数的显著变化可能导致多年冻土区面积缩减，冻结深度减少，活动层厚度增加等一系列冻土退化现象的发生[12]；季节冻土区的地表冻融指数变化速率同样不容忽视，该区是内蒙古农牧业生产主要布局地区，冻融指数的变化同农作物的种植，畜牧业的发展息息相关。气候变暖虽然是造成该区多年冻土区冻土退化显著的根本性因素，但是多种人为经济活动对研究区多年冻土退化起到了加速促进作用[24]。近40 a研究区表层土壤含水量、降水量的增加趋势表明，内蒙古地区的冻土环境正向暖湿化发展，与马梓策等[33]得出的研究结论相一致。但是基于本文研究发现，不同冻土区的发展情况存在较大差异，多年冻土区正向暖干化发展，与研究区整体和季节冻土区大部分地区变化趋势相反。地面温度升高、降水减少、潜在蒸发量增加是导致土壤含水量下降的主要因素[34]。地表冻融指

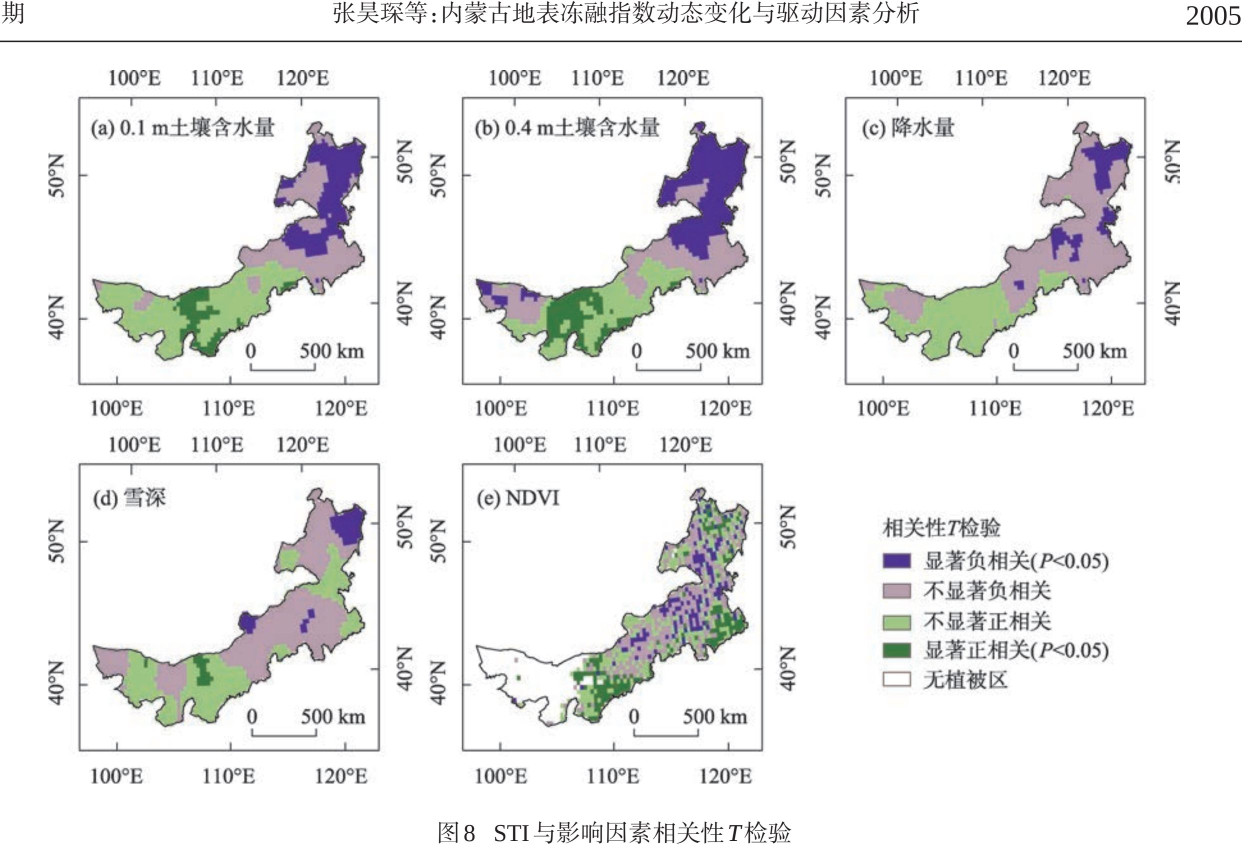


图8 STI与影响因素相关性T检验

Fig. 8 Correlation T test between STI and influencing factors

数是根据地表温度计算所得,与气温和地表温度有密切的联系,但表层土壤含水量、降水量、雪深和NDVI同样对冻融指数的变化起着至关重要的作用,总体上,表层土壤含水量和NDVI对地表冻融指数的变化起主导作用。此外,冻土环境退化对生物多样性的作用是负面的。温度增高、雨量减少的情况对草原植物生长发育不利,对森林、湿地植物有促进作用[35];季节冻土地带冬季增温明显,农作物冻害损失减少,从而促进了粮食作物单产的增加和质量提高,利于家畜健康过冬度春,同时也会使病虫害及虫卵易于过冬,容易造成病虫害的防治困难[36]。

20世纪80年代前研究区气象数据缺测较多,本研究只采用了1980—2019年的气象资料,下一步还需依据更长时间序列和更多的站点数据开展研究。在对地表冻融指数处理后,需要根据冻融指数,进一步确定研究区多年冻土空间分布范围和活动层厚度及季节冻土冻结深度的时空变化特征,对内蒙古地区冻土对气候变化的响应作出较为全面、精确的预测。目前,由于中国全球陆面再分析产品(CRA/Land)数据在冻土研究中仍具有空间分辨率略小的缺陷,在今后冻土变化研究中,拟将与空间分辨率更高的再分析资料及实际观测资料相结合,以尽可能降低研究结论的不确定性。

4 结 论

本文基于内蒙古气象站1980—2019年日均地表温度数据,结合中国第一代全球陆面再分析产品(CRA)数据以及NDVI数据,借助GIS空间分析功能,通过RStudio编程处理分析了内蒙古近40 a地表冻融指数时空变化格局及关键影响要素,主要结论如下:

(1) 1980—2019年间,内蒙古SFI与STI分别呈现明显减少与增加的态势,纬度是制约内蒙古地表冻融指数空间分布的重要因素,与SFI呈现极明显正相关的关系,则与STI相反。多年冻土区地表冻融指数变化速率较季节冻土区更为剧烈,对气候变暖的响应更为敏感。

(2) 近40 a研究区0.1 m和0.4 m土壤含水量、降水量、NDVI均呈增加趋势,仅雪深呈减少趋势。其中不同深度土壤含水量平均年际变化率为0.001 $m^3 \cdot m^{-3} \cdot (10a)^{-1}$;降水量以10.0 $mm \cdot (10a)^{-1}$的速率呈不显著增加趋势;NDVI总体以0.007·$(10a)^{-1}$的速率呈显著增加趋势;年平均雪深以−0. 82 $mm \cdot (10a)^{-1}$的速率呈微弱减少趋势。

（3）多年冻土区0.1 m和0.4 m土壤含水量、降水量、NDVI及雪深的多年均值普遍大于季节冻土区，同样影响因素在年际变化上也表现出不同的空间差异性，多年冻土区呈暖干化发展趋势，季节冻土区呈暖湿化发展趋势。

（4）地表冻融指数与影响因素以负相关关系为主，SFI与影响因素在多年冻土区大部呈正相关关系，在季节冻土区大部呈负相关关系，STI反之。内蒙古地表冻融指数变化受影响因素共同驱动，而0.4 m土壤含水量是影响SFI变化的主导因素，NDVI是影响STI变化的主导因素。

参考文献(References)：

[1] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Zhou Youwu. Permafrost in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.]

[2] 沈永平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076. [Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068–1076.]

[3] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961~2010年)[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294–2306. [Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Climate change regionalization in China (1961–2010) [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(10): 2294–2306.]

[4] Hoelzle M, Chinn T, Stumm D, et al. The application of glacier inventory data for estimating past climate change effects on mountain glaciers: A comparison between the European Alps and the Southern Alps of New Zealand[J]. Global & Planetary Change, 2007, 56(1): 69–82.

[5] Church J, Clark P, Cazenave A, et al. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Computational Geometry, 2013.

[6] 陈博, 李建平. 近50年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 432–443. [Chen Bo, Li Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 432–443.]

[7] 李倩. 全球变暖背景下冻土变化研究综述[J]. 吉林气象, 2013, 80(1): 25–28, 44. [Li Qian. A review of research on permafrost change under the background of global warming[J]. Jilin Meteorology, 2013, 80(1): 25–28, 44.]

[8] 刘秀, 李佳. 1960—2012年东北地区冻融指数时空变化研究[J]. 黑龙江科学, 2018, 9(20): 162–164. [Liu Xiu, Li Jia. Research on temporal and spatial variation of freeze-thaw index in Northeast China during the past 1960–2012[J]. Heilongjiang Science, 2018, 9(20): 162–164.]

[9] 秦大河. 中国气候与环境演变[J]. 资源环境与发展, 2007(3): 1–4. [Qin Dahe. Climate and environmental evolution in China[J]. Resources Environment and Development, 2007(3): 1–4.]

[10] 秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 869–879. [Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. Acta Meteorological Sinica, 2014, 72(5): 869–879.]

[11] Riseborough D W. Thawing and freezing indices in the activelayer [C]//Proceedings of the 8th Intemational Conference on Permafrost. Rotterdam: A. Balkema. 2003: 953–958.]

[12] Peng X Q, Zhang T J, Frauenfeld O W, et al. Past and projected freezing/thawing indices in the Northern Hemisphere[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58(3): 495–510.

[13] Sturm M, Holmgren J, Liston G E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications[J]. Journal of Climate, 1995, 8(5): 1261–1283.

[14] Nelson F E, Outcalt S I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost[J]. Arctic and Alpine Research, 19(3): 279–288.

[15] Frauenfeld O W, Zhang T, Mccreight J L. Northern hemisphere freezing/thawing index variations over the twentieth century[J]. International Journal of Climatology, 2010, 27(1): 47–63.

[16] Shi Y, Niu F, Lin Z, et al. Freezing/thawing index variations over the circum-arctic from 1901 to 2015 and the permafrost extent[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660(APR.10): 1294–1305.

[17] Liu L, Luo D L,Wang L, et al. Dynamics of freezing/thawing indices and frozen ground from 1900 to 2017 in the upper brahmaputra river basin, Tibetan Plateau[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, (1): 6–17.

[18] Wu T, Qin Y, Wu X, et al. Spatiotemporal changes of freezing/thawing Indices and their response to recent climate change on the Qinghai-Tibet Plateau From 1980 to 2013[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2018, 132(3): 1187–1199.

[19] Wang Rui, Zhu Qingke, Ma Hao. Changes in freezing and thawing indices over the source region of the Yellow River from 1980 to 2014[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(1): 257–268.

[20] 苏玥, 张存厚, 阿木尔萨那, 等. 1981—2018年内蒙古典型草原季节性冻土对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 684–694. [Su Yue, Zhang Cunhou, Amursana, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on a typical steppe of Inner Mongolia during 1981–2018[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 684–694.]

[21] 代海燕, 陈高娃, 吴建华, 等. 我国中高纬度地区冻融指数变化与冷暖急转现象[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 275–281. [Dai Haiyan, Chen Gaowa, Wu Jianhua, et al. The rate of warming is slowing and temperature is showing sharp changes in middle and high latitude regions[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 275–281.]

[22] 乌日汗. 2001—2016年内蒙古植被动态特征及其对气候变化的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020. [Uri Khan. Dynamic Characteristics of Vegetation in Inner Mongolia from 2001 to 2016, and Its Response to Climate Change[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020.]

[23] 王子玉, 许端阳, 杨华, 等. 1981—2010年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 1025-1032. [Wang Ziyu, Xu Duanyang, Yang Hua, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in Inner Mongolia, 1981-2010[J]. Progress in Geography, 2017, 36(8): 1025-1032.]

[24] 刘侦海, 王绍强, 陈斌. 2000—2015年中蒙俄经济走廊东段冻土时空变化及植被响应[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1231-1244. [Liu Zhenhai, Wang Shaoqiang, Chen Bin. Spatial and temporal variations of frozen ground and its vegetation response in the eastern segment of China-Mongolia-Russia economic corridor from 2000 to 2015[J]. Acta Geographical Sinica, 2021, 76(5): 1231-1244.]

[25] 曹斌, 张廷军, 彭小清, 等. 黑河流域年冻融指数及其时空变化特征分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 357-366. [Cao Bin, Zhang Tingjun, Peng Xiaoqing, et al. Spatial variability of freezing-thawing index over the Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 357-366.]

[26] Klene A E, Nelson F E, Hinkel SKM. The N-factor in natural landscapes: Variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River Basin, Alaska, U.S.A[J]. Arctic Antarctic & Alpine Research, 2001, 33(2): 140-148.

[27] 索玉霞, 王正兴, 刘闯, 等. 中亚地区1982年至2002年植被指数与气温和降水的相关性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1422-1429. [Suo Yuxia, Wang Zhengxing, Liu Chuang, et al. Relationship between NDVI and precipitation and temperature in Middle Asia during 1982-2002[J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1422-1429.]

[28] Deng J L. Control problems of grey systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.

[29] Wang Q, Lv W, Li B, et al. Annual ecosystem respiration is resistant to changes in freeze-thaw periods in semi-arid permafrost[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4): 2630-2641.

[30] 郭阳, 张廷军, 曹琳, 等. 黑河上游地表冻融指数与径流关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 222-227. [Guo Yang, Zhang Tingjun, Cao Lin, et al. Relationship between surface freezing/thawing index and runoff in upper reaches of Heihe River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 222-227.]

[31] 赵亚茹. 牡丹岭地区不同土地利用类型下土壤冻融变化特征分析[D]. 吉林: 东北师范大学, 2014. [Zhao Yaru. Soil Freezing and Thawing Variation Characteristics under Different Land Use Types in Mudan Ridge[D]. Jilin: Northeast Normal University, 2014.]

[32] 李昀赟, 刘鸿雁. 中国东北多年冻土区植被生长对气候变化的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(4): 783-789. [Li Yunyun, Liu Hongyan. Responses of vegetation growth to climate change in permafrost distribution region in Northeast China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(4): 783-789.]

[33] 马梓策, 于红博, 张巧凤, 等. 内蒙古地区1960—2016年气温和降水特征及突变[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 114-121. [Ma Zice, Yu Hongbo, Zhang Qiaofeng, et al. Characteristics and abrupt change of temperature and precipitation in Inner Mongolia area over the period 1960-2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 114-121.]

[34] Jin L Q, Zhang J Q, Wang R Y, et al. Analysis for spatio-temporal variation characteristics of droughts in different climatic regions of the Mongolian Plateau based on SPEI[J]. Sustainability, 2019, 11(20): 5767.

[35] 叶佳琦, 李政海, 乌云其其格, 等. 呼伦贝尔草原、湿地和森林植被对气候变化的响应[J]. 中国草地学报, 2018, 40(6): 26-32. [Ye Jiaqi, Li Zhenghai, Wuyun Qiqige, et al. The response of steppe, wetland and forest vegetation to climate change in Hulun Buir[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(6): 26-32.]

[36] 王志春, 杨军, 陈素华, 等. 气候变暖对内蒙古东部地区农牧业气候资源的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 132-137. [Wang Zhichun, Yang Jun, Chen Suhua, et al. Impact of warmer climate on agricultural and animal husbandry climatic resources in eastern Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4): 132-137.]

Dynamic changes and driving factors of the surface freeze-thaw index in Inner Mongolia

ZHANG Haochen[1,2], SA Chula[1,2], MENG Fanhao[1,2], LUO Min[1,2], WANG Mulan[1,2], GAO Hongdou[1,2], ADIYA Saruulzaya[3]

(1. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing and GIS, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Institute of Geography and Earth Ecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 15170, Mongolia)

Abstract: Using the trend analysis, correlation analysis and gray correlation, the spatial and temporal variation characteristics and driving factors of the surface freezing index (SFI) and surface thawing index (STI) in Inner Mongolia over the past 40 years were analyzed based on the daily average surface temperature data of 45 meteorological stations in Inner Mongolia from 1980 to 2019, combined with China's first-generation global land surface reanalysis product (CRA) data and the NDVI data. The study shows that the following: (1) the spatial distribution of annual mean values of the SFI had an increasing pattern from southwest to northeast, while the STI had the opposite pattern, and latitude was the key factor affecting the spatial distribution of the SFI and STI. The SFI and STI showed significant decreasing and increasing trends during the study period, with multi-year variations ranging from 956.1 to 1848.3 ℃·d and 3717.6 to 4442.3 ℃·d, respectively, and rates of change of −156.4 ℃·d·(10a)$^{-1}$ and 152.4 ℃·d·(10a)$^{-1}$. Compared with the seasonal permafrost zone, the freeze-thaw index in the multi-year permafrost zone was more sensitive to climate warming. (2) The soil SW content, precipitation, and NDVI in the study area showed an increasing trend, and the snow depth showed a decreasing trend over the last 40 years. However, the interannual variation showed different spatial variability, with a warm-dry trend in the multi-year permafrost area and a warm-wet trend in the seasonal permafrost area. The SFI, STI, and influencing factors are mainly negatively correlated. The SFI and the influencing factors were mostly positively correlated in the multi-year permafrost area and mostly negatively correlated in the seasonal permafrost area. The STI was the opposite of the SFI. The change of the SFI and STI in Inner Mongolia was driven by a combination of influencing factors, while 0.4 m of soil water content was the dominant factor affecting the change of the SFI, and NDVI was the dominant factor affecting the change of the STI. The results provide valuable references for permafrost degradation and the production of agriculture and livestock in Inner Mongolia.

Keywords: Inner Mongolia; surface freeze-thaw index; climate change; spatio-temporal characteristics; driving factors